

DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-154-164

COMPUTER SIMULATION OF ELECTRICAL PROPULSION COMPLEX FOR «YAMAL LNG» ARCTIC GAS CARRIER

L. E. Egorov, A. A. Vinogradov

Admiral Makarov State University of Maritime and Inland Shipping,
St. Petersburg, Russian Federation

At present, when studying the dynamic modes of complex objects operation, computer modeling is widely used, the basis of which is a programmatic interpretation of the mathematical model of an object that reproduces the processes of its functioning in time. The use of modern software products for mathematical modeling can significantly simplify the task of creating a model. Modern software applications for visual graphic modeling, for example, Matlab / Simulink, allow you to develop computer models without using programming skills. On modern Arctic gas tankers, six-phase synchronous electric motors with an excitation winding and damper windings on the rotor are used as propulsion motors. A computer model of the electric propulsion system of the Arctic gas tanker of the Yamal LNG project and a study of its operating modes by computer simulation are presented in the paper. For ice class vessels, the following modes are distinguished: maneuvering the vessel, the course of the vessel on the high seas, the operation of the vessel in ices. The propulsive complexes of such vessels should be adapted to these modes, providing maximum efficiency in each of them. The mathematical model of the object, its parameters, the computer model of the complex in the Matlab / Simulink environment, as well as the simulation results of the modes of maneuvering the vessel, the vessel course on the high seas and vessel work in the ice conditions, are described in the paper. The simulation results analysis from the point of view of increasing the electric propulsion complex efficiency in the various modes of its operation is carried out. Recommendations on the settings and limitations of a computer model of the electromotive propulsion complex are given. A computer model can be used both to study the functioning one complex and to develop computer models of integrated shipboard automated electric power systems with several electric propulsion systems.

Keywords: Arctic gas carrier, electrical propulsion complex, Azipod, computer model, operating mode.

For citation:

Egorov, Lev E., and Andrey A. Vinogradov. "Computer simulation of electrical propulsion complex for «Yamal LNG» Arctic gas carrier." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 12.1 (2020): 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-154-164.

УДК 621.313.323.8

КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬНОГО ПРОПУЛЬСИВНОГО КОМПЛЕКСА АРКТИЧЕСКОГО ТАНКЕРА-ГАЗОВОЗА ПРОЕКТА «YAMALMAX»

Л. Е. Егоров, А. А. Виноградов

ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала С.О. Макарова»,
Санкт-Петербург, Российская Федерация

Отмечается, что в настоящее время при исследовании динамических режимов работы сложных объектов находит широкое применение компьютерное моделирование, основой которого является программная интерпретация математической модели объекта, воспроизводящая процессы его функционирования во времени. Рассмотрены применяемые современные программные продукты для математического моделирования, позволяющие существенно упростить задачу создания модели. Современные программные приложения визуального графического моделирования, например, Matlab/Simulink, позволяют разрабатывать компьютерные модели без использования навыков программирования. На современных арктических танкерах-газовозах в качестве гребных электродвигателей используются шестифазные синхронные электродвигатели с обмоткой возбуждения и демпферными обмотками на роторе. В работе представлена компьютерная модель электродвигательного пропульсивного комплекса арктического танкера-газовоза проекта «Yamalmax» и проведено исследование его режимов работы методом компьютерного моделиро-

вания. Для судов ледового класса различают режимы: маневрирования судна, хода судна в открытом море, работы судна во льдах. Пропульсивные комплексы таких судов должны быть адаптированы к этим режимам, обеспечивая максимальную эффективность в каждом из них. В статье приведены математическая модель объекта, ее параметры, компьютерная модель комплекса в среде Matlab/Simulink, а также результаты моделирования режимов маневрирования судна, хода судна в открытом море, работы в ледовых условиях. Выполнен анализ результатов моделирования с точки зрения повышения эффективности работы электродвигательного пропульсивного комплекса в различных режимах его работы. Даны рекомендации по настройкам и ограничениям компьютерной модели электродвигательного пропульсивного комплекса. Компьютерная модель может быть использована как для исследований функционирования одного комплекса, так и при разработке компьютерных моделей единых судовых автоматизированных электроэнергетических систем с несколькими электродвигательными пропульсивными комплексами.

Ключевые слова: арктический газовоз, электродвигательный пропульсивный комплекс, Azipod, компьютерная модель, режим работы.

Для цитирования:

Егоров Л. Е. Компьютерное моделирование режимов работы электродвигательного пропульсивного комплекса арктического танкера-газовоза проекта «Yamalmax» / Л. Е. Егоров, А. А. Виноградов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2020. — Т. 12. — № 1. — С. 154–164. DOI: 10.21821/2309-5180-2020-12-1-154-164.

Введение (Introduction)

Для круглогодичной транспортировки сжиженного природного газа в Арктическом регионе в настоящее время активно строятся и эксплуатируются арктические танкеры-газовозы класса ARC7 (согласно классификации PC) с полноповоротными винторулевыми электродвигательными пропульсивными комплексами (ЭДПК) типа Azipod, способные самостоятельно двигаться в ледовых условиях без ледокольной поддержки. На рис. 1 представлена единая судовая автоматизированная электроэнергетическая система (ЕСАЭЭС) с тремя комплексами Azipod арктического танкера-газовоза типа «Кристоф де Маржери».

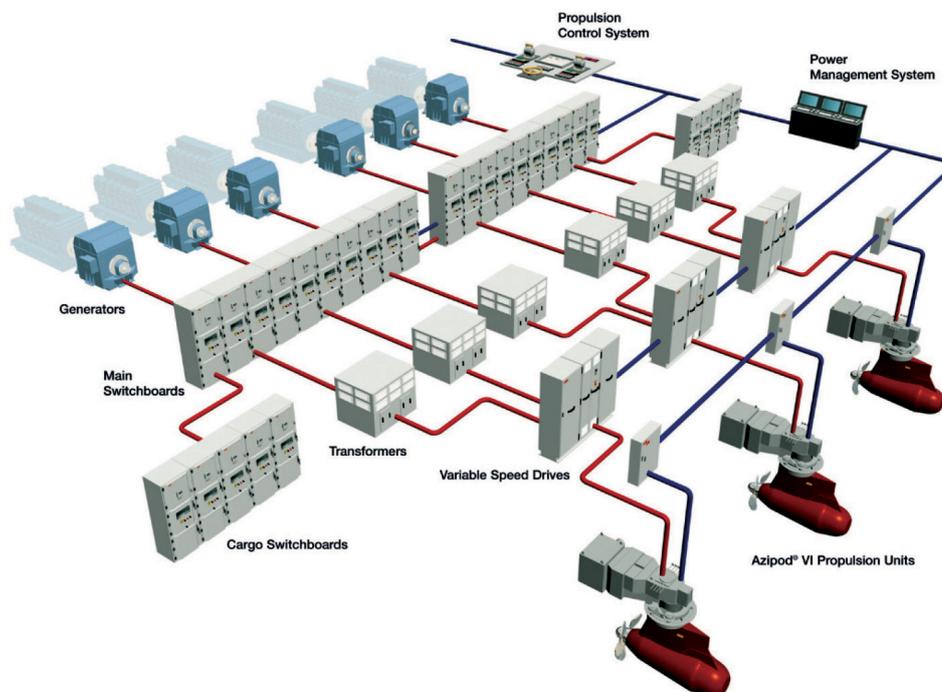


Рис. 1. Единая судовая автоматизированная электроэнергетическая система с тремя комплексами Azipod

Опыт эксплуатации таких судов и их систем электродвижения в акватории Обской губы [1] показал необходимость в дополнительных исследованиях режимов работы ЭДПК с перегрузочным

моментом на валу, разработки новых алгоритмов управления и защиты комплексов в тяжелых ледовых условиях, развитии навыков управления и поиска неисправностей для обслуживающего персонала.

Эффективным способом решения поставленных задач является компьютерное моделирование режимов работы ЭДПК в специальных компьютерных приложениях. Компьютерному моделированию современных ЕСАЭЭС посвящены работы [2]–[4], в которых рассматриваются методы расчета этих установок, при этом вопросы разработки и настройки комплексных систем автоматизации объектов рассмотрены недостаточно. В работе [5] исследуется способ проектирования систем управления сложными динамическими объектами, в основе которого находится метод модельно-ориентированного проектирования в рамках единой компьютерной среды. Таким образом, применение компьютерного моделирования при решении задач управления режимами ЕСАЭЭС является актуальным и целесообразным.

Основной целью данной работы является разработка компьютерной модели автоматизированного ЭДПК. Для этого необходимо решить следующие задачи:

1. Разработать математическую и компьютерную модель ЭДПК, учитывающую тип гребного электродвигателя (ГЭД), его параметры (активные и индуктивные сопротивления обмоток, инерционную постоянную ротора и т. д.), особенности динамики движения судна.
2. Разработать компьютерную модель системы автоматизации ЭДПК, на основе динамических характеристик модели объекта.
3. Исследовать функционирование автоматизированного ЭДПК в различных режимах работы комплекса (режим маневрирования судна, ход судна в открытой воде, ход судна во льдах) методом компьютерного моделирования.

Методы и материалы (Methods and Materials)

При исследовании динамических режимов работы объектов в настоящее время все чаще используют компьютерное моделирование, основой которого является программная интерпретация математической модели объекта, воспроизводящая процессы его функционирования во времени. Применение современных программных продуктов для математического моделирования позволяет существенно упростить задачу создания модели. Современные программные приложения визуального графического моделирования (например, Matlab / Simulink) позволяют разрабатывать компьютерные модели без использования навыков программирования [5], [6].

Основные этапы компьютерного моделирования:

1. Разработка математической модели объекта и ее программная реализация.
2. Исследование режимов работы объекта на компьютерной модели и ее верификация.
3. Разработка и проверка управляющих алгоритмов в составе компьютерной модели.
4. Анализ и интерпретация результатов моделирования, рекомендации к использованию.

В состав математической модели ЭДПК входят модель гребного электродвигателя (ГЭД), модель системы *судно – гребной винт*, а также модель системы управления. На современных арктических танкерах-газовозах в качестве гребных электродвигателей (ГЭД) используются шести-фазные синхронные электродвигатели (ШСГЭД) с обмоткой возбуждения и демпферными обмотками на роторе, математическая модель которого представлена системой уравнений (1).

Параметры ШСГЭД, используемые в модели, приведены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры шестифазного синхронного гребного электродвигателя

Наименование	Обозначение	Значение	Единица измерения
Номинальная мощность	P_n	15000	кВт
Номинальное напряжение	U_n	2950	В
Номинальный ток	I_n	2·3049	А
Номинальный момент	M_n	1326	кН·м

Таблица 1
(Окончание)

Номинальная частота вращения ротора	ω_n	108	об/мин
Номинальная частота	f_n	10,8	Гц
Активное сопротивление обмотки статора	R_s	0,0144	о. е.
Активное сопротивление обмотки возбуждения	r_f	0,008	о. е.
Активное сопротивление демпферной обмотки по продольной оси	r_D	0,0723	о. е.
Активное сопротивление демпферной обмотки по поперечной оси	r_Q	0,0447	о. е.
Сопротивление рассеяния обмотки статора	x_s	0,189	о. е.
Сопротивление рассеяния демпферной обмотки по продольной оси	x_{Ds}	0,292	о. е.
Сопротивление рассеяния демпферной обмотки по поперечной оси	x_{Qs}	0,2792	о. е.
Сопротивление рассеяния обмотки возбуждения	x_{fs}	0,37	о. е.
Сопротивление взаимоиנדукции по продольной оси (ненас.)	x_{md}	2,102	о. е.
Сопротивление взаимоиנדукции по поперечной оси (ненас.)	x_{mq}	1,099	о. е.
Сопротивление рассеяния между статорными обмотками	x_{s12}	0,00	о. е.
Постоянная ротора	T_J	1	с

$$\left. \begin{aligned}
 p\Psi_{d1} &= u_{d1} - r_s i_{d1} + \omega \Psi_{q1}; \\
 p\Psi_{q1} &= u_{q1} - r_s i_{q1} - \omega \Psi_{d1}; \\
 p\Psi_{d2} &= u_{d2} - r i_{d2} + \omega \Psi_{q2}; \\
 p\Psi_{q2} &= u_{q2} - r_s i_{q2} - \omega \Psi_{d2}; \\
 i_f &= u_f - T_f p\Psi_f; \\
 i_D &= -T_D p\Psi_D; \\
 i_Q &= -T_Q p\Psi_Q; \\
 \omega &= \frac{1}{T_J p} (m_{\varepsilon 1} + m_{\varepsilon 2} - m_c); \\
 m_{\varepsilon 1} &= \Psi_{d1} i_{q1} - \Psi_{q1} i_{d1}; \\
 m_{\varepsilon 2} &= \Psi_{d2} i_{q2} - \Psi_{q2} i_{d2}; \\
 \Psi_{d1} &= x_{s1} i_{d1} + x_{s12} (i_{d1} + i_{d2}) + \eta \Psi_{md}; \\
 \Psi_{d2} &= x_{s2} i_{d2} + x_{s12} (i_{d1} + i_{d2}) + \eta \Psi_{md}; \\
 \Psi_{q1} &= x_{s1} i_{q1} + x_{s12} (i_{q1} + i_{q2}) + \Psi_{mq}; \\
 \Psi_{q2} &= x_{s2} i_{q2} + x_{s12} (i_{q1} + i_{q2}) + \Psi_{mq}; \\
 \Psi_f &= x_{fs} i_f + \eta \Psi_{md}; \\
 \Psi_D &= x_{Ds} i_D + \eta \Psi_{md}; \\
 \Psi_Q &= x_{Qs} i_Q + \Psi_{mq}; \\
 \Psi_{md} &= x_{md} (i_f + i_D + i_{d1} + i_{d2}); \\
 \Psi_{mq} &= x_{mq} (i_{q1} + i_{q2} + i_Q),
 \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где $u_{d1}, u_{q1}, i_{d1}, i_{q1}, \Psi_{d1}, \Psi_{q1}, u_{d2}, u_{q2}, i_{d2}, i_{q2}, \Psi_{d2}, \Psi_{q2}$ — напряжения, токи и потокосцепления статорных обмоток двигателя по осям d, q ; u_f, i_f, Ψ_f — напряжение, ток и потокосцепление обмотки возбуждения двигателя; m_{1s}, m_{2s} — электромагнитные моменты двигателя; m_c — момент сопротивления двигателя; ω — относительная частота вращения двигателя; r_s — активное сопротивление

обмотки статора; T_f, T_D, T_Q — постоянные времени обмотки возбуждения и демпферных обмоток двигателя; T_j — инерционная постоянная двигателя; $x_{d1}, x_{q1}, x_{d2}, x_{q2}$ — индуктивные сопротивления статорных обмоток по продольной и поперечной осям; x_{md}, x_{mq} — сопротивления взаимоиндукции обмоток по продольной и поперечной осям; x_f, x_D, x_Q — индуктивные сопротивления обмотки возбуждения и демпферных обмоток двигателя; x_{d12}, x_{q12} — индуктивные сопротивления обмоток статора по продольной и поперечной осям; x_{s1}, x_{s2} — индуктивные сопротивления рассеяния статорных обмоток; x_{s12} — индуктивное сопротивление рассеяния взаимоиндукции между статорными обмотками; x_{fs}, x_{Ds}, x_{Qs} — индуктивные сопротивления рассеяния обмотки возбуждения и демпферных обмоток двигателя [7]–[9].

Модель системы *судно – гребной винт* в относительных единицах описывается уравнениями (2):

$$\left. \begin{aligned} T_c \frac{dv_c}{dt} &= \omega^2 - v_c^2; \\ m_c &= k_{2ш} \omega^2 - (k_{2ш} - 1) v_c^2 + m_{доп}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где T_c — постоянная времени судна; v_c — скорость судна; m_c — момент сопротивления гребного винта; где $m_{доп}$ — дополнительный момент создаваемый внешними силами (качкой судна, ледовыми массами и т. д.); $k_{2ш}$ — коэффициент момента в швартовном режиме; ω — угловая частота вращения винта.

На основе представленных уравнений в среде Matlab/Simulink разработана программа для моделирования режимов ЭДПК (рис. 2), представляющая собой совокупность компьютерной модели комплекса (рис. 3), виртуальной панели управления и средств визуализации исследуемых параметров [10]–[12]. Программа позволяет моделировать как отдельный комплекс, так и системы электродвижения с несколькими ЭДПК.

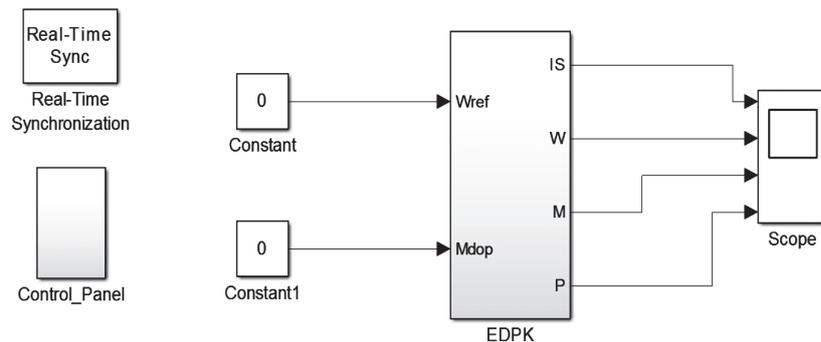


Рис. 2. Графический интерфейс программы для моделирования режимов электродвигательного пропульсивного комплекса

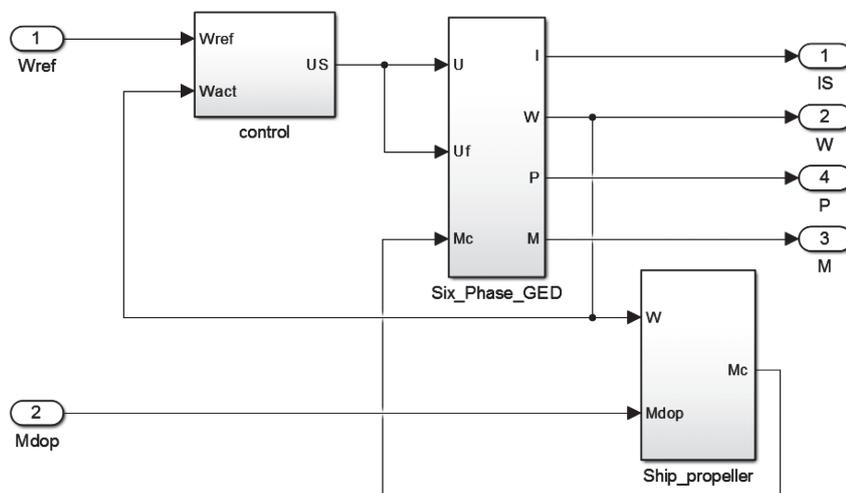


Рис. 3. Структурная схема компьютерной модели электродвигательного пропульсивного комплекса

Результаты (Results)

Различают следующие режимы работы судов ледового класса: маневрирования судна, хода судна в открытом море и работы судна во льдах. Пропульсивные комплексы таких судов должны быть адаптированы к этим режимам, обеспечивая при этом максимальную эффективность в каждом из них [13], [14].

Маневренный режим (Maneuvering Mode). В этом режиме частота вращения и мощность ЭДПК ограничены определенным диапазоном, автоматически выбирается режим регулирования частоты вращения ГЭД [15]. Система обладает максимальным быстродействием и точностью регулирования.

На рис. 4 представлены результаты моделирования маневренного режима работы ЭДПК, в данном режиме действуют следующие ограничения: частота вращения — 62,5 %, момент — 100 %, мощность — 50 %. В начальный момент времени происходит запуск ГЭД и его выход на заданную частоту вращения, в момент времени 20 с происходит увеличение момента сопротивления на валу ГЭД, в момент времени 40 с — резкое снижение момента на валу ГЭД [16], [17].

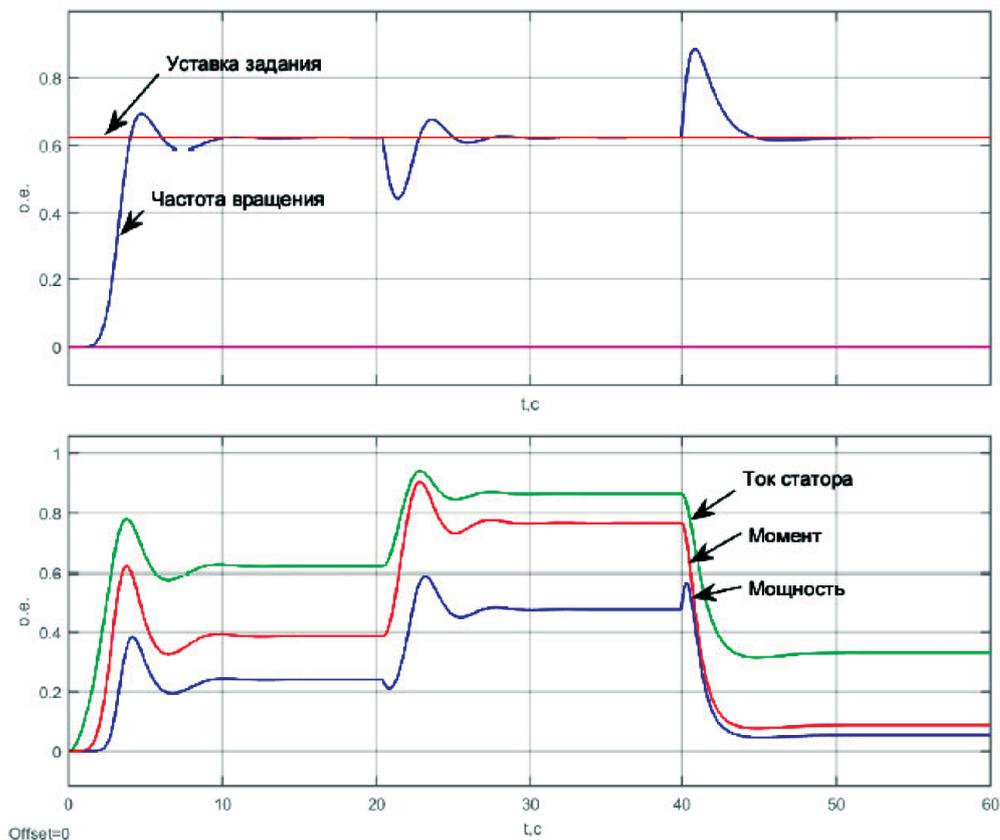


Рис. 4. Параметры электродвигательного пропульсивного комплекса при моделировании режима маневрирования судна

Режим открытого моря (Open Sea Mode). В этом режиме ограничения по частоте вращения отсутствуют. При увеличении мощности ГЭД система управления автоматически переключается с режима регулирования частоты вращения на режим регулирования мощности. На рис. 5 представлены результаты моделирования режима работы ЭДПК в открытом море. На ГЭД действуют следующие ограничения: частота вращения — 100 %, момент — 100 %, мощность — 100 %. В момент, равный 10 с, происходит запуск ГЭД и его выход на заданную частоту вращения. По мере разгона судна момент на валу ГЭД снижается, также снижаются ток статора и мощность ГЭД, при этом система управления поддерживает постоянство его частоты вращения.

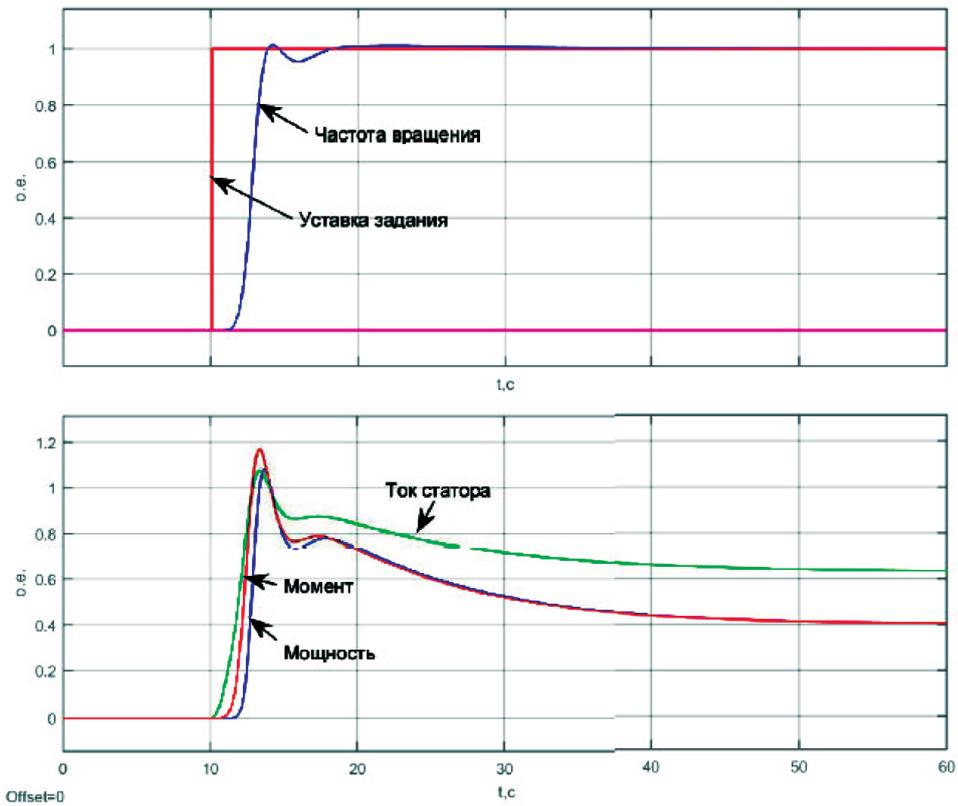


Рис. 5. Параметры электродвигательного пропульсивного комплекса при моделировании режима открытого моря

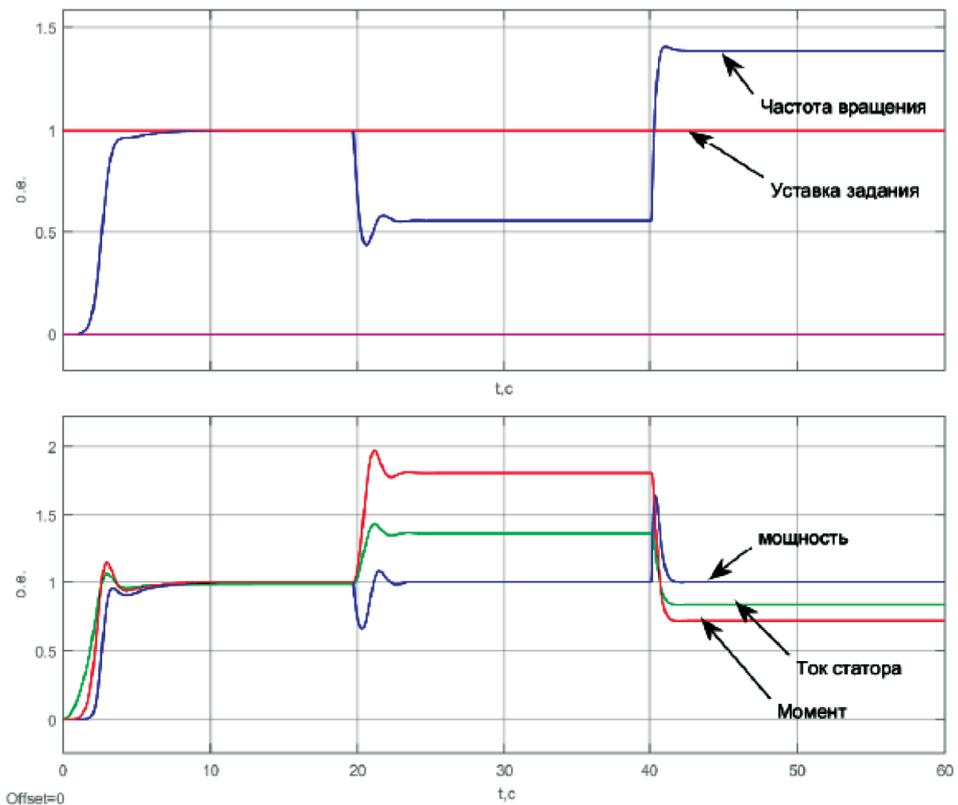


Рис. 6. Параметры электродвигательного пропульсивного комплекса при моделировании ледового режима

Ледовый режим (Ice Mode). При работе судна в ледовых условиях происходит взаимодействие гребных винтов со льдом, при этом частота вращения ГЭД может значительно снизиться. Чтобы компенсировать влияние ледовых масс на ГЭД, его крутящий момент в ледовом режиме увеличивается до 180 %. При этом система управления ЭДПК автоматически переходит в режим регулирования мощности. На рис. 6 представлены результаты моделирования ледового режима ЭДПК. В начальный момент времени происходит запуск ГЭД и его выход на заданную частоту вращения, в момент времени 20 с наблюдается резкое увеличение момента сопротивления на валу ГЭД, комплекс начинает работать в режиме с перегрузочным моментом и пониженной частотой вращения, сохраняя постоянство мощности, в момент времени 40 с происходит резкое снижение момента на валу ГЭД, комплекс переходит в режим работы при частоте вращения выше номинальной и пониженном моменте на валу.

Обсуждения (Discussions)

Результаты моделирования наглядно подтверждают, что для повышения эффективности работы ЭДПК в различных режимах его система управления должна иметь соответствующие настройки и ограничения [18]–[20]. Настройки и ограничения системы управления представленной компьютерной модели ЭДПК приведены в табл. 2.

Таблица 2

Настройки и ограничения системы управления компьютерной модели электродвигательного пропульсивного комплекса

Настройки и ограничения	Режим маневрирования	Режим открытого моря	Ледовый режим
Максимальная частота вращения, %	62,5	100	100
Максимальный момент, %	100	100	180
Максимальная мощность, %	50	100	100
Уровень автоматического перехода в режим регулирования частоты вращения, % (уменьшение параметра)	Режим регулирования частоты вращения	62,5	Режим регулирования мощности
Уровень автоматического перехода в режим регулирования мощности, % (увеличение параметра)		68	

В качестве основных рекомендаций к системам управления ЭДПК могут быть предложены следующие:

1. В маневренном режиме для обеспечения быстродействия и точности регулирования параметров использование режима регулирования частоты вращения ГЭД (Speed Mode).
2. В ледовых условиях для предотвращения резких изменений нагрузки генераторных агрегатов и перегрузки ГЭД использование режима регулирования мощности (Power Mode).
3. Для предотвращения перегрузки генераторных агрегатов использование функций ограничения и снижения мощности ГЭД.
4. Ограничение интенсивности увеличения и снижения мощности ГЭД является особенно актуальной функцией при работе главных дизель-генераторных агрегатов на природном газе, отличающихся замедленной реакцией на изменение нагрузки.
5. Для шестифазных ГЭД возможность реализации режима работы на одной статорной обмотке (Half Mode) с ограничением мощности ГЭД до 50 %.

Выводы (Summary)

К основным результатам работы можно отнести следующие:

1. В среде Matlab / Simulink разработана компьютерная модель электродвигательного пропульсивного комплекса арктического газовоза, которая позволяет исследовать динамические

режимы работы объекта как при изменениях управляющего сигнала, так и при возмущающих воздействиях со стороны гребного винта. Полученные результаты подтверждаются экспериментальными данными реальных объектов и доказывают адекватность модели.

2. С помощью полученной модели в той же программной среде разработаны управляющие алгоритмы ЭДПК в режимах с регулированием частоты вращения и мощности ГЭД, приведены основные рекомендации по настройке систем управления, которые могут быть использованы в качестве базовых при разработке судовых систем электродвижения [21], [22].

3. Метод модельно-ориентированного проектирования позволяет значительно упростить процедуру разработки систем управления элементами ЕСАЭЭС. Моделирование позволяет в короткие сроки определить динамические характеристики объектов, требования, предъявляемые к их системам управления, и ошибки их построения еще на этапе предварительного проектирования. При этом разработанные таким образом модели алгоритмы нуждаются в настройке и доработке непосредственно на реальных объектах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Колесниченко В. Ю. Единая электроэнергетическая система и гребная электрическая установка танкера ледового класса ARC7 «Штурман Скуратов» / В. Ю. Колесниченко // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 2. — С. 367–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379.

2. Васин И. М. Создание перспективных электротехнических и энергетических комплексов судовых единых электроэнергетических систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / Игорь Михайлович Васин. — СПб.: ФГБОУ ВПО «Санкт-Петербургский государственный электротехнический университет «ЛЭТИ» им. В. И. Ульянова (Ленина)», 2011. — 357 с.

3. Васин И. М. Расчет и моделирование режимов работы единых электроэнергетических систем судов с электродвижением / И. М. Васин // Современные проблемы науки и образования. — 2014. — № 3. — С. 110.

4. Калинин И. М. Развитие теории и методов расчета режимов судовых единых электроэнергетических систем: дис. ... д-ра техн. наук: 05.09.03 / И. М. Калинин. — СПб.: «Центральный научно-исследовательский институт судовой электротехники и технологии», 2014. — 328 с.

5. Деменков Н. П. Модельно-ориентированное проектирование систем управления / Н. П. Деменков // Промышленные АСУ и контроллеры. — 2008. — № 11. — С. 66–69.

6. Егоров Л. Е. Компьютерное моделирование единой высоковольтной судовой электроэнергетической системы с пропульсивными комплексами типа Azipod в нормальных и аварийных режимах работы: дис. ... канд. техн. наук : 05.09.03 : защищена 03.03.2015 / Л. Е. Егоров. — СПб.: ФГБОУ ВО «ГУМРФ им. адмирала С. О. Макарова», 2014. — 183 с.

7. Головкин С. В. Моделирование управления судовым электрооборудованием по диагностируемым параметрам / С. В. Головкин // Вестник Астраханского государственного технического университета. — 2008. — № 5 (46). — С. 34–38.

8. Труднев С. Ю. Разработка цифровых моделей режимных свойств для исследования динамической устойчивости судовой электроэнергетической системы / С. Ю. Труднев, Н. Н. Портнягин // Вестник Камчатского государственного технического университета. — 2012. — № 20. — С. 37–41.

9. Егоров Л. Е. Математические модели электронных регуляторов напряжения и частоты судовых генераторных агрегатов / Л. Е. Егоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2014. — № 1 (23). — С. 37–41.

10. Баранов А. П. Математическая модель высоковольтного бесщеточного синхронного генератора / А. П. Баранов, Л. Е. Егоров // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2013. — № 1 (20). — С. 43–46.

11. Wilffinger J. Simulation and control design of hybrid propulsions in boats / J. Wilffinger, P. Ortner, L. Del Re, M. Aschaber // IFAC Proceedings Volumes. — 2010. — Vol. 43. — Is. 20. — Pp. 40–45. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.

12. *Mahmud K.* A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks / K. Mahmud, G. E. Town // *Applied Energy*. — 2016. — Vol. 172. — Pp. 337–359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.100.
13. *Gierusz W.* Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion Part 1: Forces generated by pods / W. Gierusz // *Ocean Engineering*. — 2015. — Vol. 108. — Pp. 105–114. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.031.
14. *Yutao C.* Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System / C. Yutao, Z. Fanming, W. Jiaming // *Energy Procedia*. — 2012. — Vol. 17. — Pp. 540–546. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.02.133.
15. *Luo L.* The control and modeling of diesel generator set in electric propulsion ship / L. Luo, L. Gao, H. Fu // *International Journal of Information Technology and Computer Science*. — 2011. — Vol. 3. — Is. 2. — Pp. 31–37.
16. *Hansen J. F.* Modelling and control of marine power systems: Dr. thesis / J. F. Hansen. — Trondheim, Norwat: Norwegian University of Science and Technology, 2000. — 111 p.
17. *Sanjari M. J.* Assessing the risk of blackout in the power system including HVDC and FACTS devices / M. J. Sanjari, O. Alizadeh Mousavi, G. B. Gharehpetian // *International Transactions on Electrical Energy Systems*. — 2013. — Vol. 23. — Is. 1. — Pp. 109–121. DOI: 10.1002/etep.1619.
18. *Budashko V. V.* Physical modeling of multi-propulsion complex / V. V. Budashko, O. A. Onischenko, E. A. Yushkov // *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa City)*. — 2014. — № 2. — Pp. 88–92.
19. *Budashko V. V.* Mathematic modeling of allrange controllers speed of thrusters for ship power plants in combined propulsion complexes / V. V. Budashko, Y. A. Yushkov // *Electronic Modeling*. — 2015. — Vol. 37. — Is. 2. — Pp. 101–114. DOI: 10.15407/emodel.
20. *French C.* Control of permanent magnet motor drives using a new position estimation technique / C. French, P. Acarnley // *IEEE Transactions on Industry Applications*. — 1996. — Vol. 32. — Is. 5. — Pp. 1089–1097. DOI: 10.1109/28.536870.
21. *Mohan N.* Power electronics: converters, applications, and design / N. Mohan, T. M. Undeland, W. P. Robbins. — John Wiley & Sons, 2003. — 802 p.
22. *Yu Q.* Design, Modeling, and Simulation of Power Generation and Electric Propulsion System for IPS for All-Electric Ships / Q. Yu, N. N. Schulz // *American society of naval engineers. Virginia*. — 2007. — Vol. 358. — Pp. 1–8.

REFERENCES

1. Kolesnichenko, Vitalii U. “The unified electric power system and electrical propulsion system of the ARC7 ice-class tanker «Shturman Skuratov».” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 11.2 (2019): 367–379. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-2-367-379.
2. Vasin, I. M. Sozdanie perspektivnykh elektrotekhnicheskikh i energeticheskikh kompleksov sudovykh edinykh elektroenergeticheskikh system. Dr. Diss. Sankt-Peterburg, 2011.
3. Vasin, I. M. “Calculation and mathematical modeling of operating modes of integrated electrical power systems of vessels with electric propulsion.” *Modern problems of science and education* 3 (2014): 110.
4. Kalinin, I. M. Razvitie teorii i metodov rascheta rezhimov sudovykh edinykh elektroenergeticheskikh system. Dr. Diss. Sankt-Peterburg, 2014.
5. Demenkov, N. P. “Model’no-orientirovannoe proektirovanie sistem upravleniya.” *Promyshlennye ASU i kontroly* 11 (2008): 66–69.
6. Egorov, L. E. Komp’yuternoe modelirovanie edinoi vysokovol’tnoi sudovoi elektroenergeticheskoi sistemy s propul’sivnymi kompleksami tipa Azipod v normal’nykh i avariinykh rezhimakh raboty. PhD Diss. SPb.: FGBOU VO «GUMRF im. admirala S. O. Makarova», 2014.
7. Golovko, Sergey Vladimirovich. “Modelling of ship electrical equipment management due to diagnostic parameters.” *Vestnik of Astrakhan state technical university* 5(46) (2008): 34–38.
8. Trudnev, S. U., and N. N. Portnyagin. “Development of digital models of regime properties for research of dynamic stability of a ship electrical power system.” *Vestnik Kamchatskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* 20 (2012): 37–41.
9. Egorov, L. E. “Mathematical models of electronic voltage and frequency regulators of ships generators.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(23) (2014): 37–41.
10. Baranov, A. P., and L. E. Egorov. “Mathematical model of high-voltage brushless synchronous generator.” *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S. O. Makarova* 1(20) (2013): 43–46.

11. Wilflinger, Johann, Peter Ortner, Luigi del Re, and Michael Aschaber. "Simulation and control design of hybrid propulsions in boats." *IFAC Proceedings Volumes* 43.20 (2010): 40–45. DOI: 10.3182/20100915-3-DE-3008.00001.
12. Mahmud, Khizir, and Graham E. Town. "A review of computer tools for modeling electric vehicle energy requirements and their impact on power distribution networks." *Applied Energy* 172 (2016): 337–359. DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.03.100.
13. Gierusz, Witold. "Simulation model of the LNG carrier with podded propulsion Part 1: Forces generated by pods." *Ocean Engineering* 108 (2015): 105–114. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2015.07.031.
14. Yutao, Chen, Zeng Fanning, and Wu Jiaming. "Integrated Design Platform for Marine Electric Propulsion System." *Energy Procedia* 17 (2012): 540–546. DOI: 10.1016/j.egypro.2012.02.133.
15. Luo, Le, Lan Gao, and Hehe Fu. "The control and modeling of diesel generator set in electric propulsion ship." *International Journal of Information Technology and Computer Science* 3.2 (2011): 31–37.
16. Hansen, Jan Frederik. Modelling and control of marine power systems. Dr. thesis. Trondheim, Norway: Norwegian University of Science and Technology, 2000.
17. Sanjari, M. J., O. Alizadeh Mousavi, and G. B. Gharehpetian. "Assessing the risk of blackout in the power system including HVDC and FACTS devices." *International Transactions on Electrical Energy Systems* 23.1 (2013): 109–121. DOI: 10.1002/etep.1619.
18. Budashko, V. V., O. A. Onischenko, and E.A. Yushkov. "Physical modeling of multi-propulsion complex." *Collection of scientific works of the Military Academy (Odessa City)* 2 (2014): 88–92.
19. Budashko, V. V., and Y. A. Yushkov. "Mathematic modeling of allrange controllers speed of thrusters for ship power plants in combined propulsion complexes." *Electronic Modeling* 37.2 (2015): 101–114. DOI: 10.15407/emodel.
20. French, Chris, and Paul Acarnley. "Control of permanent magnet motor drives using a new position estimation technique." *IEEE Transactions on Industry Applications* 32.5 (1996): 1089–1097. DOI: 10.1109/28.536870
21. Mohan, N., T. M. Undeland, and W. P. Robbins. *Power electronics: converters, applications, and design*. John Wiley & Sons, 2003.
22. Yu, Q., and N. N. Schulz. "Design, Modeling, and Simulation of Power Generation and Electric Propulsion System for IPS for All-Electric Ships." *American society of naval engineers. Virginia* 358 (2007): 1–8.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Егоров Лев Евгеньевич — соискатель
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С.О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: lev-egorov@mail.ru

Виноградов Андрей Александрович —
доцент
ФГБОУ ВО «ГУМРФ имени адмирала
С. О. Макарова»
198035, Российская Федерация, Санкт-Петербург,
ул. Двинская, 5/7
e-mail: Eric_esseker@mail.ru, kaf_saees@gumrf.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Egorov, Lev E. — Applicant
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: lev-egorov@mail.ru

Vinogradov, Andrey A. —
Associate professor
Admiral Makarov State University of Maritime
and Inland Shipping
5/7 Dvinskaya Str., St. Petersburg, 198035,
Russian Federation
e-mail: Eric_esseker@mail.ru, kaf_saees@gumrf.ru

Статья поступила в редакцию 11 ноября 2019 г.
Received: November 11, 2019.